

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Mécanique des fluides, procédés, énergétique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Nicolas HÉRENGER

Thèse dirigée par **M. Francis Mc-CLUSKEY**

préparée au sein du

**Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels
(LEGI)**

dans l'École Doctorale IMEP2

Etude expérimentale du transitoire de remplissage des cavités d'injection d'organes de combustion (Version diffusable simplifiée)

Thèse soutenue publiquement le 8 octobre 2012,
devant le jury composé de :

M. L. DAVOUST	Président
M. J. BONJOUR	Rapporteur
M. Patrice Le GAL	Rapporteur
M. F. Mc-CLUSKEY	Directeur de thèse
M. A. CARTELLIER	Examineur
M. S. PONCET	Examineur
Mme M. THERON	Invitée

Résumé

Le transitoire de remplissage d'une cavité intermédiaire située en amont de la chambre de combustion s'avère être une étape critique qu'il faut s'efforcer de maîtriser. Cette cavité est directement reliée à la chambre de combustion par des injecteurs. Des outils numériques sont actuellement en cours de conception : ils permettront à terme de simuler le remplissage de cette cavité dans l'espace. Afin de valider ces outils numériques, un programme expérimental a vu le jour, impliquant Snecma, le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et le LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels). Il s'agit de mener à bien des expériences « simples » et reproductibles afin de disposer d'une base de données expérimentales qui servira de cas tests pour les simulations.

Un banc d'essais expérimental a été progressivement mis en place et instrumenté au LEGI. Le fluide utilisé pour les expériences est l'eau. On a choisi de respecter une similitude du nombre de Weber entre le cas « réel » et les conditions expérimentales. Ce dernier équivaut au rapport des forces d'inertie sur les forces de tension de surface. Deux campagnes d'essais ont été réalisées, dans lesquelles on s'est centré sur l'étude des aspects hydrodynamique du transitoire de remplissage : variation du débit total et des pressions au cours d'un essai, évaluation du taux de vide dans la cavité, visualisation de l'écoulement dans la cavité et en sortie des injecteurs. L'instrumentation à disposition est constituée d'un débitmètre à effet Coriolis, de capteurs de pression, d'une sonde optique, de caméras rapides et d'un laser pour l'imagerie.

La première campagne d'essais a visé le remplissage de la cavité en eau seule. Le paramètre de contrôle principal était la pression génératrice de l'écoulement liquide. Dans la deuxième campagne d'essais on injecte simultanément dans la cavité un écoulement d'eau et un écoulement d'air. Le paramètre de contrôle supplémentaire est le débit de gaz initial. Ces campagnes ont également souligné l'importance du profil d'ouverture de la vanne de l'écoulement liquide sur le transitoire de remplissage de la cavité.

Ces campagnes d'essais constituent une première étape dans la compréhension du transitoire de remplissage de la cavité. Elles ont permis de visualiser la forme de l'écoulement dans la cavité et en sortie des injecteurs et d'identifier certains phénomènes intervenant dans le remplissage de la cavité.

Mots-clés :

Ecoulement transitoire, écoulement diphasique, nombre de Weber.

Abstract

The filling transitory phase of an intermediate tank located upstream of the combustion chamber, has proved to be a very important stage that must be handled. This tank is directly linked to the combustion chamber through injectors. Numerical tools are currently under development. They will allow to simulate the filling of this tank in the space. In order to validate those numerical tools, an experimental program has been launched. It involves Snecma, the CNES (Centre National d'Etudes Spatiales : National Centre for Spatial Studies) and the LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels : Laboratory of Geophysical and Industrial Flows). Simple and repeatable experiments must be run. They will allow to gather experimental data that will further be used as test cases for the simulations.

A test bench has been brought into service step by step at the LEGI, as well as scientific instruments. Water is used for the experiments. A similarity of flows based on the Weber number has been chosen between the real case and the experiment. The Weber number measures the relative importance of the fluid inertia compared to its surface tension. Two experimental campaigns have been realized, that have focused on the dynamic aspects of the filling transitory phase : variations of the total flow and of the pressures measured during an experiment, evaluation of the void fraction in the tank, flow visualization in the tank and at the outlet of the injectors. The scientific instrumentation used is made of a Coriolis flow-meter, pressure probes, an optical probe, and high speed cameras with a laser for the flow visualization.

The first experimental campaign has studied the tank filled with water only. The main control parameter is the reference pressure of the liquid flow. In the second campaign, both liquid and air flows are simultaneously injected in the tank. The additional control parameter is the initial gas flow. Those campaigns have shown as well the importance of the valve opening that controls the liquid flow.

Those campaigns are a first step in the understanding of the filling transitory phase of the cavity. They have permitted to visualize the flow in the tank and at the outlet of the injectors and to point out some important phenomena occurring during the tank filling.

Key words :

Transitory flow, bi-phase flow, Weber number.

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract.....	4
Table des matières.....	5
CHAPITRE I – CONTEXTE ET ASPECTS EXPERIMENTAUX	6
PARTIE I – INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	7
I Nécessité d’une étude	8
II Collaboration entre Snecma, CNES et LEGI.....	8
PARTIE II – ÉTAT DE L’ART.....	9
I Etudes préliminaires	10
1 PRÉSENTATION DU NOMBRE DE WEBER.....	10
2 CHOIX D’UN FLUIDE DE SUBSTITUTION.....	11
II Mise en place de l’expérience	12
1 ETAT DU BANC D’ESSAIS AU DÉPART DE LA THÈSE	12
1.1 <i>Circuit amont</i>	<i>12</i>
1.2 <i>Vanne et commande de vanne</i>	<i>13</i>
2 CONCEPTION DES PARTIES MANQUANTES	13
2.1 <i>Matériaux à utiliser.....</i>	<i>13</i>
2.2 <i>Caractéristiques de l’instrumentation.....</i>	<i>14</i>
2.3 <i>Cas des sondes optiques.....</i>	<i>14</i>
Résumé des principaux résultats issus de l’étude expérimentale.....	16
REFERENCES.....	19

CHAPITRE I – CONTEXTE ET ASPECTS EXPERIMENTAUX

PARTIE I – INTRODUCTION GÉNÉRALE

**

*

I Nécessité d'une étude

L'allumage est une phase de fonctionnement critique pour les organes de combustion. Un délai important entre l'arrivée des ergols dans la chambre de combustion, en sortie des injecteurs, et l'allumage du moteur se traduit généralement par des pics de pression dans la chambre au moment de la propagation de la flamme. Cela peut induire des dégâts mécaniques, une instabilité de la flamme, voire l'arrêt du moteur.

Or, la topologie de l'écoulement dans la cavité intermédiaire située juste en amont de la chambre de combustion influence directement l'alimentation des injecteurs et la forme de l'écoulement entrant dans la chambre.

On comprend alors l'importance d'étudier l'hydrodynamique du transitoire de remplissage de cette cavité.

II Collaboration entre Snecma, CNES et LEGI

La validation complète de modèles numériques nécessite la mise en œuvre d'expériences simples et reproductibles afin d'acquérir une base de données expérimentales suffisamment étendue. Cela requiert l'utilisation d'une version instrumentée de la cavité d'injection et la possibilité d'un accès visuel à l'intérieur de la cavité.

Dans cette perspective, une collaboration a vu le jour entre Snecma (Groupe SAFRAN, Division Moteurs Spatiaux), le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et le LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels), en 2006. Du côté du LEGI, cette collaboration est menée par Alain Cartellier (Directeur de recherches) et Francis McCluskey (Professeur des Universités). Leur principal interlocuteur chez Snecma était dans un premier temps Nicolas Meyers, auquel a succédé en 2012 Pierre Boivin. Marie Theron représente le CNES.

La collaboration entre Snecma, le CNES et le LEGI inclut la mise en place, au LEGI, d'un banc d'essais afin d'étudier le remplissage du dôme LOX.

PARTIE II – ÉTAT DE L'ART

**

*

I Etudes préliminaires

Une des premières questions qui se pose est celle du fluide à utiliser dans les expériences en substitution par rapport à l'ergol « réel ». Il est aussi nécessaire de choisir une similitude à respecter entre le fluide de substitution et l'ergol afin que les expériences soient « représentatives » vis-à-vis des grandeurs réelles. On choisit de respecter une similitude basée sur le nombre de Weber (We).

1 Présentation du nombre de Weber

Le nombre de Weber (We) correspond au rapport des forces d'inertie et de la tension superficielle. Pour un écoulement diphasique (gaz et liquide), avec un liquide s'écoulant à la vitesse V_L , on définit le nombre de Weber de la façon suivante :

$$We = \frac{\rho_L V_L^2 D}{\sigma_{LG}} \quad (1)$$

où ρ_L est la masse volumique du liquide, σ_{LG} la tension superficielle entre le liquide et le gaz, et D une longueur caractéristique.

Un We élevé correspond à un écoulement où les forces d'inertie sont prépondérantes par rapport à la tension superficielle. C'est, par exemple, le cas d'un jet qui se désagrège en un grand nombre de gouttes. Un We faible correspond, à l'inverse, à un écoulement où la tension superficielle prédomine sur les forces d'inertie : l'écoulement garde sa cohésion et a moins tendance à se diviser en particules de plus petite taille.

Dans notre étude, les plus hauts We correspondent à des écoulements liquides qui « explosent » en structures de plus petite taille à l'intérieur de la cavité alors que les plus faibles renvoient à des écoulements où la tension de surface est susceptible de structurer l'écoulement à plus grande échelle. Le nombre de Weber permet ainsi de « qualifier » le jet liquide entrant dans la cavité.

2 Choix d'un fluide de substitution

La présente étude ne concerne que les aspects hydrodynamiques du transitoire de remplissage de la cavité. Dans cette perspective, l'eau présente l'avantage d'une utilisation simple et à faible coût. Elle permet d'explorer une gamme de nombres de Weber conséquente.

II Mise en place de l'expérience

Le banc d'essais est un dispositif comprenant une vanne motorisée, une partie en aval de la vanne, représentant la cavité et les injecteurs, et une partie en amont de la vanne, assurant l'alimentation du dispositif en liquide. On appelle respectivement « circuit amont » et « circuit aval » les parties en amont et en aval de la vanne motorisée. La vanne motorisée est elle-même nommée « vanne principale ».

Cette section décrit l'état initial, au début de l'étude, du banc d'essais. On décrit les équipements déjà disponibles au début de l'étude ainsi que les études techniques ayant été réalisées pour concevoir les parties manquantes.

1 Etat du banc d'essais au départ de la thèse

Au début de la présente étude, le circuit amont était en cours d'installation. La vanne principale et sa motorisation avaient été acquises et testées. On aborde ci-dessous les considérations techniques ayant dicté le choix des équipements.

1.1 Circuit amont

Le circuit amont comprend un réservoir liquide. Il assure l'alimentation en liquide du circuit aval, via la vanne principale. Il doit générer un écoulement liquide au débit souhaité et être instrumenté pour permettre à l'opérateur de connaître la valeur instantanée du débit.

Concernant le stockage et la mise sous pression du liquide, un accumulateur à vessie, dans lequel un « ballon » gonflable (ou vessie) pressurise le liquide, a été choisi. Le liquide, séparé du gaz par une membrane étanche, n'est pas pollué par le gaz dissous. Lorsque la vanne principale est fermée et que le circuit « amont » est rempli de liquide, on gonfle la vessie avec le gaz. Lors de l'ouverture de la vanne, le liquide est instantanément mis en mouvement.

Par ailleurs, les principales contraintes ayant guidé le choix d'un débitmètre sont l'étendue de la gamme de mesure et le temps de réponse. Les débits expérimentaux sont susceptibles de se situer dans une fourchette large, depuis de faibles débits (correspondant à de petits nombres de Weber) jusqu'aux débits les plus élevés (correspondant à We_{\max}). On

s'attend à ce que le débit liquide évolue rapidement au cours de la phase transitoire de l'écoulement, ce qui nécessite un débitmètre avec un temps de réponse le plus faible possible. Un débitmètre à effet Coriolis a été choisi car il offre le meilleur compromis entre l'étendue de la gamme de mesure et le temps de réaction. Il est de plus relativement simple d'utilisation et ne nécessite pas de longueurs minimales de conduites droites en amont et en aval. Cela permet de limiter l'encombrement du banc expérimental.

1.2 Vanne et commande de vanne

Pour les besoins de l'étude, la vanne est pilotable et doit avoir un temps de réponse très court. Nous avons opté pour une commande de la vanne par moteur électrique. La vanne et sa motorisation ont été testées au laboratoire. Les gains d'asservissement en position du moteur ont été réglés de façon à minimiser le temps de réponse de la vanne.

2 Conception des parties manquantes

Au début de la présente étude, le circuit en aval de la vanne n'était pas complètement conçu. Le circuit aval doit comporter une cavité et des injecteurs. Les géométries utilisées pour représenter la cavité et ses injecteurs sont simplifiées par rapport aux géométries réelles.

2.1 Matériaux à utiliser

Parmi les objectifs définis par Snecma et le CNES, on doit pouvoir visualiser le comportement du fluide dans la cavité d'injection et les injecteurs. Le LEGI a opté pour la construction de plusieurs cavités et ensembles d'injecteurs entièrement transparents. Plusieurs matériaux ont été proposés : verre, polycarbonate (PC), polyméthacrylate de méthyle (PMMA). Pour des raisons de faisabilité technique, de tenue mécanique et de qualité optique, le PMMA a été choisi.

2.2 Caractéristiques de l'instrumentation

De façon générale, pour la détection de phénomènes transitoires, il est souhaitable que l'instrumentation ait un temps de réponse le plus faible possible. Les boîtiers d'acquisition des capteurs doivent, pour les mêmes raisons, avoir des fréquences d'échantillonnage suffisamment élevées. Les capteurs de pression choisis sont à jauges de contrainte piézo-résistives, d'utilisation courante en laboratoires.

2.3 Cas des sondes optiques

Les sondes optiques sont des capteurs utilisés dans la recherche pour la détection de phases en écoulement multiphasique. Il s'agit de fibres optiques dont la pointe est en contact avec l'écoulement. Elles sont parcourues par un rayonnement incident, d'intensité connue. La détection des phases est basée sur la différence entre leurs indices de réfraction.

On suppose, en exemple, que la pointe de la sonde est entièrement immergée dans une phase, d'indice de réfraction n_e . L'indice de réfraction de la sonde est notée n_f , l'angle des rayons incidents i et celui des rayons réfractés r . La loi de Snell-Descartes donne :

$$n_f \sin i = n_e \sin r \quad (2)$$

Le rayonnement est entièrement réfléchi si $r > 90^\circ$. D'après (2), cela implique que l'angle d'incidence est supérieur à l'angle critique i_c défini par $i_c = \arcsin n_e / n_f$. La sonde peut donc différencier deux milieux s'ils sont d'indices suffisamment distincts [1].

La quantité mesurée est l'intensité du rayonnement réfléchi revenant en arrière dans la sonde optique. Elle est convertie en tension si bien que l'opérateur voit un certain niveau de tension lorsque la pointe de la sonde rencontre un milieu, et un niveau différent lorsque la pointe rencontre un deuxième milieu (à supposer que les milieux soient d'indices de réfraction différents). Pour les signaux analysés lors de la présente étude, la tension délivrée est à un niveau « haut » lorsque la pointe est sèche. Elle chute à un niveau « bas » si une goutte mouille la pointe de la sonde.

Il a été montré que les sondes optiques peuvent de plus mesurer les tailles et vitesses de gouttes ou de bulles sous certaines conditions. La géométrie de la pointe de la sonde peut

être optimisée dans ce sens [2][3]. Les sondes utilisées ont été spécialement développées pour la présente étude par l'entreprise A2PS, basée à Grenoble (www.a2photonicsensors.com).

Résumé des principaux résultats issus de l'étude expérimentale

Nous avons divisé notre travail en deux parties : la première concerne le remplissage de la cavité en eau seule, la deuxième en eau et en air. Dans les deux cas, nous nous sommes basés sur les mesures de débit liquide total (Q_L), de pression en amont de la vanne principale (P_{amont}) et dans la cavité ($P_{\text{cavité}}$), et sur les visualisations de l'écoulement, en particulier en sortie des injecteurs. Les paramètres de contrôle sont le nombre de Weber de référence $We_{\text{réf}}$ (lié à la pression génératrice de l'écoulement liquide), τ (le délai nécessaire à l'ouverture de la vanne), et le taux de dilution de référence $\beta_{\text{réf}}$ (lié au débit initial d'air).

La première partie a mis en évidence une succession d'événements marquant le transitoire de remplissage. La pression dans la cavité croît au cours du transitoire de remplissage. A partir d'un « seuil » de $We_{\text{réf}}$ on observe nettement un maximum de $P_{\text{cavité}}$. Puis $P_{\text{cavité}}$ diminue et se stabilise à une valeur palier correspondant au régime d'écoulement stationnaire. Q_L commence à croître à l'ouverture effective de la vanne, atteint un maximum à la pleine ouverture avant de diminuer et de se stabiliser à une valeur correspondant au régime stationnaire.

En augmentant $We_{\text{réf}}$, à τ constant, la durée du transitoire de remplissage diminue dans le temps. En variant la durée τ à $We_{\text{réf}}$ constant, on module le débit avec lequel l'écoulement commence à remplir la cavité : en augmentant τ au-dessus d'une valeur critique τ_c , la cavité se remplit avant la pleine ouverture de la vanne.

La dernière partie du travail met en évidence l'influence de l'écoulement simultané d'air sur le transitoire de remplissage. A $We_{\text{réf}}$ et τ constants, l'écoulement d'air, dans nos conditions, n'influence pratiquement pas la chronologie du transitoire de remplissage. En revanche, il a une influence importante sur la morphologie de l'écoulement à travers les injecteurs.

CONCLUSION

Une collaboration a vu le jour entre Snecma, le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et le LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, à Grenoble). Elle vise à la mise en place, au LEGI, d'expériences simplifiées par rapport au remplissage de cavités d'alimentation d'organes de combustion réels. Outre la forme générale de l'écoulement, l'étude doit permettre d'identifier et d'expliquer les phénomènes prépondérants marquant le transitoire de remplissage.

Les travaux de thèse dont il est ici question constituent un premier pas dans cette étude. Un banc d'essais expérimental a été mis en place progressivement, ainsi que son instrumentation. L'état d'avancement du banc d'essais a permis d'étudier les aspects purement hydrodynamiques du remplissage. Nous nous basons sur une similitude du nombre de Weber, qui exprime le rapport des forces d'inertie sur les forces de tension de surface. Nous utilisons comme fluides de substitution l'eau et nous avons la possibilité d'injecter également de l'air dans la cavité. Les paramètres de contrôle sont la pression génératrice de l'écoulement liquide, le débit volumique initial d'air, et le temps d'ouverture de la vanne qui contrôle l'écoulement liquide. L'étude se base sur les variations de la pression dans la cavité, de la pression en amont de la vanne, du débit liquide total, sur les mesures de taux de vide dans la cavité (par sonde optique) et sur les visualisations de l'écoulement dans la cavité et en sortie des injecteurs.

Deux campagnes d'essais ont été réalisées, qui ont chacune apporté leur contribution à la connaissance du transitoire de remplissage de la cavité. Une première campagne a ciblé le transitoire de remplissage de la cavité en eau seule, sans injection d'air. Une deuxième campagne concernait le remplissage de la cavité en eau et en air.

Au cours de cette thèse, nous avons pu identifier et expliquer certains phénomènes importants intervenant dans le transitoire de remplissage de notre cavité. Notre étude a apporté une meilleure compréhension du transitoire de remplissage réel. Les visualisations de l'écoulement dans la cavité, et surtout en sortie des injecteurs, ont permis une première description de la topologie de l'écoulement pendant les premiers instants du remplissage.

La présente thèse a apporté des premiers éléments de réponse à la problématique du transitoire de remplissage d'une cavité d'alimentation d'organes de combustion. En continuant à rassembler des données expérimentales, il sera bientôt possible de finir le

développement des outils de simulation numérique. Ceux-ci permettront à terme de simuler le remplissage de ces cavités d'alimentation.

REFERENCES

- [1] CARTELLIER A., « Optical probes for local void fraction measurements: Characterization of performance », Rev. Sci. Instrum., février 1990, Volume 61 (2), p. 874 - 886

- [2] CARTELLIER A., BARRAU E., « Monofiber optical probes for gas detection and gas velocity measurements: optimised sensing tips », International Journal of Multiphase Flow, 1998, Volume 24, p. 1295 - 1315

- [3] CARTELLIER A., « Measurement of gas phase characteristics using new monofiber optical probes and real-time signal processing », Nuclear Engineering and Design, 1998, Volume 184, p. 393 - 408